

原子力発電所建設の是非

Pros and Cons of the Construction of Nuclear Plant

洪 起
KOH Ki

キーワード：原子力発電所、放射能汚染、自然災害、最適設計、信頼性理論

Keywords : Nuclear Plant, Radiation Contamination, Natural Disaster, Optimum Design, Reliability Theory

From an economical point of view minimizing the sum of the expected values of loss caused by disasters and the construction cost, this paper describes a probabilistic method for deriving the optimum shear force coefficient of structures under the optimum design based on structural reliability theory. Besides, the pros and cons of the construction of nuclear plant are discussed scientifically from a standpoint of the optimum design.

1. はじめに

日本は地震国である。地球上の陸地の2.5%しかない日本列島とその周辺海域で、世界の地震の約1割が発生するという有数の地震危険地帯である。

2011年3月11日宮城県牡鹿半島沖でマグニチュード9の大地震とその直後の空前の大津波によって、三陸から福島、茨城、千葉にいたる太平洋沿岸の町々を根こそぎ崩壊し、住民に甚大な被害をもたらした。もうひとつの被害は、福島原子力発電所の原子炉損傷による放射能汚染である。原子炉建屋の水素爆発により炉心から拡散した放射性物質は、土壌に、大気に、海洋に散らばり、国民の健康・人生・生命ばかりでなく、財産も奪い、経済活動に重大な影響を及ぼした。原発事故は、ひとたび深刻な放射能汚染事故が起きると、途方もない被害が発生し、時間的に空間的に抑制できない。そのため、絶対に起こしてはならない災害事象である。

日本の原発による発電能力は全体の3割程度であり、その数は世界第3位で、世界原発数の1割強の54基である。そのうちの6割以上が日本建築学会の地震危険係数が高い地域に集中している。さらに、建設・計画中の原発も十数基あるという。世界第1位はアメリカの104基であるが、地震地帯の西海岸のカリフォルニア州に在る数基のみで、その大部分は地震のない内陸部と東海岸に位置している。1960年に記録上、過去最大のマグニチュード9.5の大地震が起きたチリには原発はない。

日本近海の地震発生メカニズムにより、東海、東南海、南海の3連動海溝型地震と活断層で発生する直下型大地震の可能性を想定するならば、日本は原発災害に遭遇するリスクが世界で一番高い国であると云わざるを得ない。無論、リスクが高いからと云って、原子力諸施設の耐震設計が不十分で、耐震性能に問題があると云っているのではない。

地震・津波の発生場所とその特性および規模等に関する諸事象に対して、不確定要素のない完全な確定的事象としての科学的知見が得られていれば、この知見から規定される設計条件が原発建設のための耐震指針となり、この指針を満たす経済性を考慮した最適設計も可能であり、理論的には原発災害リスクは存在しないと云っても過言ではない。言い換えれば、地震・津波に関する不確定要素が存在する限り、原発災害リスクは存在するのである。

一般に、耐震指針は、地震・津波等の自然災害に関する総合的な研究成果に基づく科学的知見に応じて、相対的に規定されるものであり、絶対的なものではない。そのため、ひとたび事故が発生すれば、途方もない災害を引き起こすような原発建設の耐震指針では、自然災害に対する安全性確保のための特別な設計上の余裕が必要であることは云うまでもない。

1995年の阪神大震災後、どんな地震が起きても壊れないとされてきた高速道路と新幹線の高架が崩れたことをきっかけとして、設計の想定値を超えるような地震・津波により、甚大な被害が生じる可能性があることを多くの地震学者・研究者によって指摘されたし、さらに、東電研究者も、2006年の国際会議で、福島第1原発に設計の想定値を超える津波が来る確率を、確率論的リスク評価手法により推定し、設計の想定値を超える確率は「50年以内に10%」とし、10mを超える確率も約1%あると発表している。このような地震・津波の被害調査・研究による最新の知見に従い、既存原発が地震・津波による災害リスクが高い状態にあることを十分認識して既存原発の安全性に関する再検討が行われたが、結果的に、2007年の新潟県中越沖地震で想定を上回る揺れにより、柏崎刈羽原発の電源部分に損傷が生じ、微量ながら放射能漏れ事故を起こした。さらに、今回の東日本大地震では、送電用鉄塔の倒壊と14mを超える津波による全電源喪失により、大量の放射性物質を大気中に拡散させる大事故を引き起こした。

今回の福島原発事故の主要原因が、核燃料棒の冷却システムの電源部分の損傷にあると云われていることを考えると、柏崎刈羽原発事故の教訓が生かされていなかったのである。また、阪神大震災後、地震学者・建設構造研究者により、既存原発の耐震補強が急務であり、安全性向上のための諸施設の適切な構造上の補強工事は必要であるという強い指摘があったはずである。これらの必要な補強工事がどのような形で処理されたのか徹底的な客観的立場からの検討が必要になるだろう。これまでの教訓や研究成果が生かされなかった理由が、日本社会と会社内における学者・研究者の地位が比較的低く、会社の利益優先がその根底にあったとすれば大変残念であり、また、日本は、人間の思想や価値が座標軸上で位置づけられる相対化社会であることも強く影響していると、個人的に思っている。

日本での原発事故を契機として、世界各国で原発の安全性に関する再点検が行われると同時に、将来のエネルギー戦略に関する議論も活発に行われている。アジアでは、中国、韓国で、また、ヨーロッパでは、フランス、ドイツ、イタリアおよびスイスで深い議論が行われている。フランスは、フランス伝統の演繹的手法による安全性確認のための論理展開により、原発は安全であるという結論を導き、国家主導のエネルギー戦略に基づく判断のもとで原発を維持し、その姿勢を崩していない。フランスの放射能汚染水の浄化技術はその論理展開のなかで必要な技術ということであらう。ドイツは、原発の更なる安全性向上のために莫大な経費が嵩むことを懸念し、将来の新しい経済活動の可能性をかけた経済合理性の追求を念頭において自然エネルギーにかじを切った。人間性重視と効率性を考えたドイツ伝統がその根底にあると思われる。イタリアは、1986年の旧ソ

連のチェルノブリ事故後、裁判所の判断による国民投票により原発廃止を決定し、現在はない。今後に関しては、最高裁の判断により原発再開を問う国民投票が実施され、最終的に、イタリア国民の投票者の94%が脱原発の道を選択した。イタリアは、国の重大事に対して歴史的に裁判所が関わるようである。イタリア国民の脱原発の選択に対して、集団ヒステリー状態と評した日本の某政治家がいたが、知的貧困なのか、それとも、ことの重大性を全く理解していないのかのいずれかであろう。スイスは、経済的余裕に基づく判断と思われるが、ドイツ同様に、自然エネルギーにかじを切った。それぞれの歴史的伝統文化に基づく国家のアイデンティティーがあるようで、大変興味深い。日本も、事故後の定期点検中の原発の再開時期やそのための条件および使用済み燃料棒の処理を含む将来のエネルギー戦略に関する政策上の重大な意思決定に際して、国家としてどのようなアイデンティティーが関わってくるのだろうか、楽しみである。

日本でも、将来のエネルギー戦略に関して、新聞、テレビおよび雑誌等で学者・原発研究者により盛んに議論されているが、大別して、次の三つの意見に集約されるだろう。一つ目は原発推進派の意見である。今回の事故前までは、電力エネルギーの安定確保、温暖化対策等の観点から我が国として原発は不可欠であるとし、原発の安全性については、「安全神話」、すなわち、絶対安全であるという信頼に基づき事故は起きないとしている。事故後も、このたびの事故は大変残念でならないとしたうえで、今回の教訓を十分反映することを前提に、今後も原発は進めるべきであると主張している。しかしながら、絶対安全とはリスクゼロを意味するもので、科学的には存在しない。イタリアでは、2009年4月に309人の犠牲者を出したイタリア中部のラクイラ地震で、地震直前に「安全宣言」を出したイタリアの地震学者7人が起訴された。一方、日本では、原発推進のために「安全神話」の宣伝・普及活動に関わった科学者、政財界と高級官僚および東電の責任追及に関して、今のところなにもない。相対化社会では、責任は無いということなのだろう。

二つ目は反対派の意見である。今回の事故は想定外ではなく、既に指摘されていたリスクが顕在化したものと位置づけ、現在の科学技術では放射性物質を完全にコントロールできないという考えのもとで、原発が有する総体としての問題点を指摘して事故の再発を危惧し、即刻、自然エネルギーへの転換を主張している。

最後の三つ目は、新規の原発建設は回避し、既存原発を維持しながら老朽化した原発を廃炉にし、徐々にその数を減らし、自然エネルギーに転換する意見である。環境エネルギー政策研究所による戦略的エネルギーシフトという案もあるが、これは、約3割を原子力に依存する従来のエネルギー体制から自然エネルギーなどへ比重を移し、エネルギー全体のバランスを漸進的に変えていこうというもので、そのバランスの割合を時系列上の目標値として具体的に述べているが、基本的考え方は三つ目の意見に属するだろう。

原発推進派と反対派の対談では、両者の溝は深く、なかなか議論が成立しない平行線のままの長い歴史があるようである。この溝は、前述のように、原発の安全性に関する基本的理念の違いから生じるものである。原発推進派は、今回の事故により、原発は安全であるという前提条件が崩れたのであるから、国民が理解できる安全の理念をどのように構築するかが極めて重要な問題になる。原発は必要であるからとして安全性ばかりを強調し、危険性には触れないような不正確かつ不誠実な考えに基づく理念では、原発を推進するための論理として成立しない。エネルギー政策問題は日本社会の将来を左右する重大な問題であるので、国民的議論を深めて行くことが重要である。また、

同時に、これだけの原発災害が起きると、原発の賛否をめぐる議論も激しいものになり、災害直後でもあることから、多少感情的に熱くなることも十分理解できるが、論点を明確にし、思慮深く、丁寧かつ建設的な原発論議が必要になる。原発推進か否かのような国民の将来の社会生活に重大な影響を及ぼすような意思決定事項に関しては、政府や専門家のみで決めるのではなく、幅広い観点から国民的に議論するプロセスを踏むことが必要であると思われる。そうすれば、仮に原発災害が生じて、その決定プロセスにおける議論を通してリスクを共有することができ、東電役員が被災者の前で土下座して謝罪するような非文明的光景を見ないで済むだろう。

原発事故の原因究明が徹底的に行われれば、事故前と比べて、格段に充実・強化した安全対策が実施されることは確実であり、原発の安全性は大きく向上すると思われるが、一方で、今後は、原発事故を絶対に起きない事象として、科学的観点から100%の安全性を保障することはできなくなったのである。安全性向上のための調査・研究により、原発事故の生起確率は極めて小さくなり、その逆数で表される再現期間は十分長くなると思われるが、原発事故は科学的には再現性を有する災害事象として規定されることになる。

結局、今後の原子力発電所建設の是非は、安全神話による絶対安全の理念に基づくのではなく、原発事故を再現性を有する事象と見なしてうえで、判断しなければならなくなったのである。それ故、この是非は、原発建設と原子炉の運転・管理および事故が発生したときの損害賠償、さらに、40～60年と云われる原発寿命を、事故がなく、無事、役割を全うすることができたとしても、その後に残される多くの使用済み燃料棒の保管および廃炉・解体処分等を含めた包括的な運営事業が、一民間企業の合理的経済活動として成立するか否かに大きく依存する。なぜならば、フランスのように政府主導のエネルギー戦略のもとでの原発推進の場合は別として、民間企業による採算を度外視した事業はあり得ないからである。

原子力発電所は、ひとたび地震・津波等の自然災害による損傷・崩壊が生じると、同時に、放射能汚染災害を引き起こし、周辺地域に甚大な被害をもたらすので、耐震設計上は安全性に関して十分な余裕が必要な重要建築物として位置づけられている。そのため、現在、原子力発電所のような重要建築物の耐震設計には、層せん断力係数を割増す係数、すなわち、重要度係数（または用途係数）を乗じることで耐震性を高める手法が取られ、具体的数値が示されている。しかしながら、その根拠については触れていない[1]。

本報告は、建築物崩壊による全損害額を最小にするように設計パラメータを決める最適設計の立場から、設計式の中に建築物の重要度を表す重要度係数と、地震活動の活発さの度合いに応じて地域を分類する地震地域係数を合理的に導入する一手法を展開する。また、原子力発電所は原子炉やタービンのそれぞれの建屋および運転・管理のための諸施設全体を表すが、ここでは、解析上、この施設全体を一つの重要建築物としてモデル化し、今回の福島原発事故でも分かるように、ひとたび原発事故を起こすと、損害賠償や事故対応の債務は想像を絶する莫大な金額になるが、そのような場合にも重要建築物崩壊による全損害額の期待値を最小にする安定した唯一の値としての最適設計パラメータが存在するか否かの理論的展開を試みることで、重要建築物、すなわち、原子力発電所建設の是非に関する議論に加わることにする。

2. 新耐震設計法で規定される設計式

昭和56年の新耐震設計法で規定されている1次設計の地震層

せん断力係数 Q_i と 2 次設計のための必要保有水平耐力 Q_{um} を求める設計式は、次式

$$\begin{aligned} Q_i &= ZR_i A_i W_i C_0 \\ Q_{um} &= D_{es} F_{es} ZR_i A_i W_i C_0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

ただし、 Z : 地震地域係数 (0.7 ~ 1.0)
 R_i : 振動特性係数
 A_i : 地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数
 W_i : 建築物の上部から i 層までの建築物の重力
 C_0 : 標準せん断力係数
 D_{es} : 構造特性係数
 F_{es} : 形状特性係数

で示され、それぞれの係数が積の表現式になっているが、このような表現式に至った理論的根拠は示されていない。また、これまでの諸事情により、(2-1) 式には重要度係数は導入されていない。しかしながら、阪神大震災を教訓として、国の施設や学校建築物の耐震性を高め、その機能を保持しようとする考えが共有され、実際に、層せん断力係数を割増す設計が実施されている。

それ故、将来的には、重要度係数が設計式の中に陽な形で取り入れられるだろうと思われる。尚、文献 [1] で規定されている重要度係数の取り扱いでは、1 から 3 までの数値を乗じて層せん断力係数を割増す簡便な方法が示されている。また、諸外国においても、ほぼ同様な考え方に基づいて決められている。

3. 建築物の耐震安全性規範と崩壊確率

一般に、入力地震動を受ける建築物の振動モデルは、構造解析上、弾性変形のみが生じる場合は弾性系で、また、塑性変形が生じる場合は弾塑性系でモデル化される。弾塑性系の損傷の程度を表す指標は、大別して次の 2 つのタイプに分けられる。1 つは、応答期間中に生じる最大変形または塑性率であり、他の 1 つは、応答期間中に構造部材に生じる塑性ひずみによって累積される累積塑性率である。一般に、この 2 つの応答値の大小によって、建築物の損傷レベルや崩壊の有無が論じられている。

文献 [1] 等で記述されているように、弾塑性応答の基本特性に関する数値的考察から、振動系の周期が比較的短周期の範囲で入力地震動により振動系に吸収されるエネルギーが弾性系と弾塑性系とではほぼ等しいという「エネルギー一定則」、または、周期が比較的長周期の範囲でかつ降伏強度ある限度以上という条件のもとで、弾塑性系の最大変位は弾性系の最大変位にほぼ等しくなるという「変位一定則」を用いるならば、バイリニア型履歴またはスリップ型履歴を有する弾塑性系の最大変位は、初期周期が等しい弾性系の応答値から近似的に推定することができる。また、累積塑性率も同様に、弾性系の応答値から近似的に推定することができる [1]。

本報告では、弾塑性系の耐震安全性規範として、最大変位応答を用いることにし、その耐震安全上の許容限界値は予め与えられているものとする。前述の一定則により、弾性系から弾塑性系の応答値を推定することができるから、ある降伏強度を有するバイリニア型またはスリップ型の復元力モデルを仮定するならば、弾塑性系の許容限界値は、剛性が同じで、降伏強度を十分高くした耐震安全上等価な弾性系の許容限界値に変換することが可能である。

降伏強度を有する完全弾塑性系復元力モデルの場合の許容限界値と、「エネルギー一定則」または「変位一定則」を用いて弾性系に置換したときの許容限界値の関係は簡単に図示される。

これらの許容限界値は許容される最大変位ピーク値を表す。この一定則が成立する条件のもとでの耐震安全性規範は次式で表すことができる。

$$X_{p,n} < X_{p,t} = \frac{X_{p,t,N}}{\xi} \quad (3-1)$$

$$\text{ただし、「エネルギー一定則」の場合: } \xi = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_y}{Q_p} + \frac{Q_p}{Q_y} \right)$$

「変位一定則」の場合: $\xi = 1$

$X_{p,n}$: 変位ピーク数 n の中の最大ピーク値

$X_{p,t}, X_{p,t,N}$: 弾性系と弾塑性系のそれぞれの

変位の許容限界値

Q_p : 最大変位ピーク時の強度

Q_y : 降伏強度

入力地震動として、ある周波数特性を有するランダム過程を想定するならば、一般に、弾性系の変位ピーク値はレイリー分布になり、このピーク値の最大値の確率分布関数は漸近的に極値 I 型分布に収束する。ここで、変位応答値が許容限界値である閾値レベルを初めて超える崩壊確率がある程度小さい領域を対象とすれば、予め指定された許容限界値 $X_{p,t}$ に対する崩壊確率 P_f の近似値は次式になる。

$$P_f \approx \exp\{-\alpha_n(X_{p,t} - u_n)\} \quad (3-2)$$

$$\text{ただし、} \alpha_n = \frac{\sqrt{2 \ln n}}{\sigma}, u_n = \sigma e \sqrt{2 \ln n}, e \geq 1$$

σ : 弾性振動系の変位応答の標準偏差

上式中のパラメータ α_n, u_n は、変位ピーク数 n の関数で表される [7]。さらに、 e は、建築物に剛性率の偏りや偏心がある場合、振動中の建築物は振じり現象を起こし変位応答が増大するので、その影響を表した係数である。 $e=1$ の場合は、これらの影響がないことを意味する。このように、剛性率の偏りや偏心が応答値に及ぼす影響を考慮するために、標準偏差に乘じた係数として (3-2) 式に組み入れた。

(3-2) 式は、建築物が確率 1 で入力地震動を受けたときの変位応答が許容限界値を初めて超える崩壊確率である。地震の生起事象の確率モデルは定常ポアソン過程でモデル化されるものとすれば、崩壊確率の分散がある程度小さいという仮定のもとで、近似的に t 年後の建築物の安全の確率は次式になる。

$$R(t) = \exp\{-\lambda P_f t\} \quad (3-3)$$

ただし、 $R(t)$: t 年後の建築物の安全の確率

λ : 構造工学的に意味のある強さ以上の地震の単位年間当たりの平均生起回数

P_f : 確率 1 で地震動を受けたときの建築物の崩壊確率

上式中の建築物の崩壊確率はピーク値がその許容限界値に等しくなったときの崩壊確率 (3-2) 式で表される。この許容限界値は建築物の材料強度等から決められる値で、一般には、

確定値として扱われるが、本報告では、材料強度の不確定性を考慮して確率変数として扱い、その期待値と変動係数をそれぞれ $\bar{X}_{p,t}$, $V_{Xp,t}$ とする。最大変位ピークの期待値 $\bar{X}_{p,n}$ の代わりに、構造特性係数 D_{es} を用いて降伏震度の期待値の項で表すと、(3-3) 式は次のようになる。(Appendix A)

$$R(t) = \exp\left\{-\lambda \bar{P}_f t\right\} \quad (3-4)$$

$$\text{ただし、} \quad \frac{g\bar{C}_{p,n}}{\omega_0^2} = \bar{X}_{p,n} \quad , \quad \bar{C}_Y = D_{es} \bar{C}_{p,n}$$

$$\bar{P}_f \approx \exp\left\{-\alpha_n \left(\frac{g\mu\bar{C}_Y}{\omega_0^2 D_{es}} - u_n\right) + \frac{\alpha_n^2 g^2 \mu^2 \bar{C}_Y^2 V_{Xp,t}^2}{2\omega_0^4 D_{es}^2}\right\}$$

$$\mu = \frac{\bar{X}_{p,t}}{\bar{X}_{p,n}}, \quad \bar{X}_{p,n} = \sigma\sqrt{2\ln n} + \frac{\zeta\sigma}{\sqrt{2\ln n}}, \quad \zeta = 0.5772$$

\bar{X} : 確率変数 X の期待値

C_Y : 降伏震度

m, g : 振動系の質量と重力加速度

ω_0 : 弾性振動系の固有円振動数

4. 建築物の最適降伏設計震度

一般に、建築物は安全なほどよいし、被害も少ないほどよい。被害を小さくするためには、建築物の降伏震度を高めて応答の許容限界値を上げる必要があるため、結果として建設費を高めることになる。一方、降伏震度を高めることで被害が少なくなり、建築物崩壊による損害額は小さくすることができる。この2つの関係は震度の変化においてトレードオフの状態になる。

建設費は将来の利益を得るための初期投資で出費であるから建設時は損害額である。この項では、建設費と建築物が崩壊したときの損害額の和で表される全損害額を最小にする最適設計に基づき決められる最適降伏設計震度の解析的表現式を導出する。

ここで、花井と同様に、次式で定義される目的関数を用いる[4][5]。

$$E[D] = \int_0^{t_u} W_D(t) \left[-\frac{\partial R(t)}{\partial t} \right] dt + C_S(C_Y) \quad (4-1)$$

$$W_D(t) = \int_t^\infty p \exp(-\gamma\tau) d\tau$$

ただし、 $E[D]$: 建築物の崩壊による全損害額 D の期待値

$W_D(t)$: 建築物が t 年後に崩壊したときの損害額

$C_S(C_Y)$: 建築物の建設費で、降伏震度の関数

γ : 年利率

p : 建築物に期待される年間利益

t_u : 建築物の使用予定年度

(4-1) 式に (3-4) 式を代入し、微小項を無視すれば次式が得られる。

$$E[D] = \frac{W_D(0)}{\gamma} \lambda \bar{P}_f + C_S(C_Y) \quad (4-2)$$

上式の右辺の第1項は、0年後、すなわち、竣工直後に建築物が崩壊したときの全損害額の期待値である。建築物の崩壊がその周辺および近県に放射能汚染等の重大な災害を引き起こす

ような原子力発電所を想定するならば、損害賠償および事故対応のために要する全経費も損害額になるので、これも上乗せすることができる。建設費は、変数として震度を用いて、次式で表されるものとする[6]。

$$C_S(C_Y) = C_{SR} \left[1 + k \left(\frac{C_Y}{C_R} - 1 \right) \right] \quad (4-3)$$

ただし、 C_{SR} : 震度 $C_R = 0.2$ のときの建設費
 k : 0.05, 0.1 程度の値

(4-2) 式と (4-3) 式の C_Y の代表値として、その期待値 \bar{C}_Y を用い、次式

$$\frac{\partial E[D]}{\partial \bar{C}_Y} = 0 \quad (4-4)$$

から、 \bar{C}_Y の最適値 $\bar{C}_{Y,opt}$ を求めると次式になる。

$$\frac{\gamma\omega_0^2 D_{es} C_{SR} k}{W_D(0) \lambda \alpha_n g \mu_{opt} C_R} = \left(1 - \frac{\alpha_n g \mu_{opt} V_{Xp,t}^2}{\omega_0^2 D_{es}} \right) \bar{P}_{f,opt} \quad (4-5)$$

ただし、

$$\bar{P}_{f,opt} = \exp\left\{-\alpha_n \left(\frac{g\mu_{opt} \bar{C}_{Y,opt}}{\omega_0^2 D_{es}} - u_n\right) + \frac{\alpha_n^2 g^2 \mu_{opt}^2 \bar{C}_{Y,opt}^2 V_{Xp,t}^2}{2\omega_0^4 D_{es}^2}\right\}$$

$$\mu_{opt} = \frac{\bar{X}_{p,t}}{\bar{X}_{p,n,opt}} : \text{変位応答に対する最適安全率}$$

上式の最適安全率と (3-4) 式から、 $\bar{C}_{Y,opt}$ と μ_{opt} の関係式が得られる。この関係式と (4-5) 式から最適降伏震度の期待値が得られる。また、上式から正の最適降伏震度が得られるためには、上式の右辺は正でなければならないから、変位の許容限界値の変動係数は次式を満たす必要がある。

$$V_{Xp,t} < \sqrt{\frac{6V_{Xp,n}}{\pi\mu_{opt}}} \quad (4-6)$$

ただし、 $V_{Xp,n} = \frac{\pi}{\sqrt{6(2\ln n + \zeta)}} : X_{p,n}$ の変動係数 [7]

変動係数 $V_{Xp,t}$ は、建築物の構成要素の材料強度に関するパラメータから得られる変動係数であり、通常の値は0.1程度またはそれ以下である。一方、(4-6) 式の右辺は n のある程度大きい数に対して0.1以上の値を示すので、(4-6) 式の条件が満たされ、最適値は存在する。因みに、 $n=50, \mu_{opt}=2$ のときの値は0.244である。

特別な場合として、変位の許容限界値を確定値として扱うならば、 $V_{Xp,t}=0$ であるから、 $\bar{C}_{Y,opt}$ は (4-5) 式から次式になる。

$$\bar{C}_{Y,opt} = \frac{\omega_0^2 D_{es}}{\alpha_n g \mu_{opt}} \left\{ \alpha_n u_n + \ln \left[\frac{W_D(0) \lambda \alpha_n g \mu_{opt} C_R}{\gamma \omega_0^2 D_{es} C_{SR} k} \right] \right\} \quad (4-7)$$

ただし、 $\alpha_n u_n = 2\ln n$

上式は、「エネルギー一定則」または「変位一定則」を用いて、

弾性振動系を構造特性係数 D_{es} を有する弾塑性振動系に置換したときの最適降伏震度を表す。最適降伏震度と弾性系の最適震度のそれぞれの期待値の関係式は、 D_{es} を用いると次式になる。

$$\bar{C}_{Y,opt} = D_{es} \bar{C}_{p,n,opt} \quad (4-8)$$

ただし、「エネルギー一定則」の場合： $D_{es} = \xi - \sqrt{\xi^2 - 1}$

「変位一定則」の場合： $D_{es} = 1$

以上により、ひとたび事故や崩壊が発生したときの損害賠償および事故対応の債務を含めた莫大な損害額をほぼ確定値として予想することができれば、この損害額を（４－７）式の $W_d(0)/\gamma$ に上乘せすることにより、唯一の値としての最適降伏震度が決まり、最適設計に基づく耐震設計が可能になる。それ故、この確定値としての全損害額を上回る利益を上げる事業展開ができれば、現実的には電気料金の値上げによる利益確保になると思われるが、理論上は、原子力発電所建設による電力事業はビジネスとして成立する。無論、このように設計された建築物が実際に建設可能な強度および規模になるかどうかは別問題である。

しかしながら、今回の福島原発事故に関して、新聞や雑誌等でも触れているように、原発事故による全損害額は莫大な金額に膨れ上がるだろうと予想されているが、全損害額を確定的金額として見積もることは大変難しいとされている。これは、周辺地域の住民の健康にも重大な影響を及ぼし、また、原発事故の関連被害範囲が時間的かつ空間的に特定できないため不確定要素が多く、被害全体像の不透明感により、全損害額の変動が激しくどの程度膨らむか全く予想がつかない状況になっているからであると思われる。このような場合にも、最適設計に基づく唯一の値としての最適降伏震度が存在するか否かの議論は後の項で述べることにする。

5. 建築物の最適層せん断力係数分布

弾塑性振動系の最適降伏震度は（４－７）式で表されることを前項で示した。この項では、現在、新耐震設計法で規定されている設計式（２－１）式が（４－７）式から導出されることを示し、さらに、原子力発電所のような重要建築物の設計式で考慮される重要度係数や地震地域係数の合理的導入方法について述べる。

一般建築物と重要建築物の２つの建築物を想定し、それぞれの最適降伏震度の相対関係において成立する式を導出する。

一般建築物と重要建築物の最適安全率と変位ピーク値の変動係数は同じ値を有するものとする、それぞれの建築物の最適降伏震度を下記のように表すことにする。

$$\bar{C}_{Y,opt,i} = \frac{\omega_0^2 D_{es,i}}{\alpha_{n,i} g \mu_{opt}} \left\{ \alpha_n u_n + \ln \left[\frac{W_{D,i}(0) \lambda_i \alpha_{n,i} g \mu_{opt} C_R}{\gamma \omega_0^2 D_{es,i} C_{SR} k} \right] \right\} \quad (5-1)$$

ただし、 $i = G$ ：一般建築物

$i = M$ ：重要建築物または地盤、偏心等に関する特性を有する建築物

$W_{D,i}(0), \lambda_i, D_{es,i}, \alpha_{n,i}$ ：建築物が i の場合のそれぞれの係数

上式中の $\alpha_n u_n$ は、（４－７）式により、建築物の種類に依存しない。

ここで、（５－１）式から得られる２つの最適降伏震度の相対関係から成立する式を導出するために、新しく次の６つの式を

導入する。

$$\begin{aligned} \frac{W_{D,M}(0)}{\gamma} &= \tilde{I} \frac{W_{D,G}(0)}{\gamma} \\ \lambda_M &= \tilde{Z} \lambda_G \\ \sigma_M &= R_i \sigma_G \\ D_{es,M} &= D_{es} D_{es,G} \\ e_M &= F_{es} e_G \\ \bar{C}_{Y,opt,M} &= C \bar{C}_{Y,opt,G} \end{aligned} \quad (5-2)$$

ただし、 \tilde{I}, \tilde{Z}, C ：定数

（５－１）式から得られる２つの式と（５－２）式から、APPENDIX B の（Ｂ－１）式が得られる。この式で、耐震安全性規範にも依存するが、最適安全率は通常は２前後の値であり、一般建築物の最適降伏震度は 0.2 ～ 0.3 程度の値である。変位ピークの最大値を 3σ と見なしたときに（３－４）式から得られるピーク数 n は 50 である。そのとき、（４－６）式から得られる最大変位ピーク値の変動係数 $V_{xp,n} = 0.153$ であり、 $D_{es} \cdot R_i$ は 1 より小さく、 F_{es} は 1 ～ 1.5 程度の値であることを考慮すれば、左辺の第２項は 1 より十分小さい値と見なし無視することができる。さらに、右辺の \tilde{I} は、一般建築物と重要建築物が崩壊したときのそれぞれの損害額を関係づける係数であり、また、 \tilde{Z} は地震活動が活発な地域とそうでない地域での地震の頻度を関係づける係数である。重要建築物として原発のような建築物を想定し、建築物崩壊による損害額に、放射能汚染災害による損害賠償や事故対応のための諸経費を上乘せすれば、損害額は莫大な金額になる。それ故、 \tilde{I} は十分大きな値とすることができる。

一方、構造工学的に意味のある強さ以上の地震動を解析対象とし、地震活動が活発な地域を標準地域とすれば、 \tilde{Z} は 1 または 1 より多少小さい値になる。結局、（Ｂ－１）式の $\tilde{I} \tilde{Z}$ は $D_{es} F_{es} R_i$ に比べて十分大きな値になり、さらに、一般建築物の最適降伏震度は 0.2 ～ 0.3 程度であるから、これらの項を無視すれば、結局、次式で表すことができる。

$$C = D_{es} F_{es} R_i \left\{ 1 + \frac{\sqrt{6} V_{xp,n}}{\pi \mu_{opt}} (\ln \tilde{I} + \ln \tilde{Z}) \right\} \quad (5-3)$$

上式に、建築物の重量、地震層せん断力係数の高さ方向の分布および標準せん断力係数を導入すれば、層せん断力係数分布と保有水平耐力は次式で表される。

$$\begin{aligned} Q_i &= R_i A_i W_i I Z C_0 \\ Q_{un} &= D_{es} F_{es} R_i A_i W_i Z C_0 \end{aligned} \quad (5-4)$$

$$\text{ただし、} \quad I Z = 1 + \frac{\sqrt{6} V_{xp,n}}{\pi \mu_{opt}} [\ln \tilde{I} + \ln \tilde{Z}]$$

$$Z = 1 + \frac{\sqrt{6} V_{xp,n}}{\pi \mu_{opt}} [\ln \tilde{Z}]$$

I ：重要度係数（または、用途係数）

Z ：地震地域係数

（５－４）式は、 $\tilde{I} = 1$ とすれば、現行の設計式（２－１）式に一致する。

上式から分かるように、重要度係数と地震地域係数が層せん断力係数分布に及ぼす効果は、2つのパラメータ、すなわち、最大ピーク値の変動係数と最適安全率に依存した評価になる。最大ピーク値の変動係数が大きいと、建築物が振動中に崩壊領域に到達する可能性が大きくなるので、層せん断力係数と保有水平耐力に及ぼす効果が大きくなり、また、安全率を大きく設定すれば、建築物は安全領域に留まる可能性が大きくなるので、それらの効果は小さくなる。

前述のように、日本は地震国であるから、地震活動が活発な地域を標準地域とすれば、 $\tilde{Z} \leq 1$ となるから、 $\ln \tilde{Z}$ は負になり、地震活動が活発でない地域に建設される建築物の層せん断力係数分布は低減される。 $V_{xp,n} = 0$ の場合は、最大変位ピーク値の確率的変動がない確定的な変位応答状態を表すから、予想される入力地震動は確定値になり、重要度係数と地震地域係数は層せん断力係数分布に無関係になる。入力地震動が確定値であれば、変位応答のピーク値も確定値になり、許容限界値の変動係数を無視しているから、変位応答の最大ピーク値より大きい許容限界値に対して建築物の耐震安全性は100%保障される。このように、(5-4)式は建築物の耐震安全性が確定的事象として評価されるような場合は、この2つの係数は無関係になると言う直感的判断を裏付けるものである。それ故、この2つの係数、すなわち、建築物の崩壊の重大性と崩壊に対する安全性に関する係数は、建築物の崩壊が確率的事象として見なされる場合にのみ考慮しなければならない要素になる。

6. 不確定要素が最適降伏震度に及ぼす影響

(4-7)式の最適降伏震度は、(4-1)式に含まれるパラメータに不確定要素がなく、確定値として評価されるという条件のもとで得られたものである。前項でも述べたように、建築物崩壊による損害額が莫大な金額になる場合も、それを確定値として見積もることができれば、(4-5)式または(4-7)式から唯一の値としての最適降伏震度が得られる。また、一般建築物崩壊による損害額との比較から重要度係数を評価することができれば、(5-4)式から設計式が決まる。いずれの場合も、唯一の値としての最適降伏震度が存在し、建築物崩壊による全損害額を最小にする最適設計に基づく耐震設計は可能である。

しかしながら、建築物の損傷・崩壊により原発事故が発生した場合、周辺地域の住民の健康にも重大な影響を及ぼし、また、原発事故の関連被害範囲が時間的かつ空間的に特定できないため不確定要素が多く、被害全体像の不透明感により全損害額の変動が激しくどの程度膨らむか全く予想がつかない。そのため、確定値として見積もることが全く困難になる。このような場合に、不確定要素の変動が最適降伏震度に及ぼす影響を検討することは重要である。

この項では、(4-1)式に含まれるパラメータのうちで、建築物崩壊による損害額、地震の単位年当たりの生起回数および建設費の3つのパラメータの変動を考慮して、これらを確率変数として表す。全損害額の変動係数を目的関数として定義し、この3つのパラメータの変動係数がこの目的関数に及ぼす影響を検討する。

全損害額の分散は次式で表される。

$$\sigma_D^2 = \int_0^t \int_0^t E \left[W_D(t_1) \cdot W_D(t_2) \cdot \frac{\partial R(t_1)}{\partial t_1} \cdot \frac{\partial R(t_2)}{\partial t_2} \right] dt_1 dt_2 - \left\{ \int_0^t E \left[W_D(t) \left(-\frac{\partial R(t)}{\partial t} \right) \right] dt \right\}^2 + \sigma_{C_s}^2 \quad (6-1)$$

ただし、 $\sigma_D^2, \sigma_{C_s}^2$: 全損害額と建設費のそれぞれの分散

工学的に意味のある強さ以上の地震事象を解析対象として、統計的に独立であるとすれば、 $V_{xp,i} = 0$ のときの全損害額の変動係数は次式で表される。

$$V_D = \frac{\sqrt{V_W^2 + V_\lambda^2 + V_W^2 V_\lambda^2 + V_C^2 \tilde{X}^2}}{1 + \tilde{X}} \\ \tilde{X} = \frac{\bar{C}_s}{\bar{W}_D \bar{\lambda} \bar{P}_f} \\ \bar{C}_s = C_{SR} \left[1 + k \left(\frac{\bar{C}_Y}{C_R} - 1 \right) \right] \\ \bar{P}_f = \exp \left\{ -\alpha_n \left(\frac{g \mu_{opt} \bar{C}_Y}{\omega_0^2 D_{es}} - u_n \right) \right\} \quad (6-2)$$

ただし、 $\bar{W}_D, \bar{\lambda}, \bar{C}_s$: $W_D(0)/\gamma, \lambda, C_s$ の期待値

V_D, V_W, V_λ, V_C : $D, W_D(0)/\gamma, \lambda, C_s$ の変動係数
(6-2)式を最小にする降伏震度は次式から得られる。

$$\frac{\partial V_D}{\partial C_Y} = 0 \quad (6-3)$$

上式から得られる降伏震度を \tilde{C}_Y とすれば、次式になる。

$$\tilde{C}_Y = \frac{\omega_0^2 D_{es}}{\alpha_n g \mu_{opt}} \left\{ \alpha_n u_n + \ln \left[\frac{\bar{W}_D \bar{\lambda} C_R (V_W^2 + V_\lambda^2 + V_W^2 V_\lambda^2)}{V_C^2 C_{SR} k} \right] \right\} \quad (6-4)$$

(6-4)式は建築物崩壊による全損害額の変動係数を最小にするときの降伏震度である。この震度が(4-7)式の最適降伏震度に近いか離れているかが問題になる。無論、この両震度が一致することが望ましい。

(4-7)式と(6-4)式から得られる震度を直接比較するよりも、相対的に比較したほうが容易である。それ故、(4-7)式に含まれる3つのパラメータを期待値と見なし、両式に含まれる共通のパラメータを消去すれば、次式が得られる。

$$\exp \left\{ (R-1) \left(\bar{C}_{Y,opt} + \frac{\pi \mu_{opt}}{\sqrt{6} V_{xp,n}} \right) \right\} = \frac{\sqrt{6} V_{xp,n} \bar{C}_{Y,opt}}{\pi \mu_{opt}} \left(\frac{V_W^2 + V_\lambda^2 + V_W^2 V_\lambda^2}{V_C^2} \right) \\ \text{ただし、} R = \frac{\tilde{C}_Y}{\bar{C}_{Y,opt}} \quad (6-5)$$

建築物崩壊による損害額の変動が大きく、確定値として見積もることできない場合を想定しているため、(6-5)式において R と V_W の関係に注目する。

表1 V_w の値 ($\bar{C}_{Y,opt} = 1, V_\lambda = V_C = 0.05$)

$R \setminus \mu_{opt}$	1.33	1.5	1.67
0.9	0.081	0.075	0.073
1.0	0.159	0.170	0.180
1.1	0.287	0.345	0.392
1.2	0.506	0.686	0.836
1.3	0.887	1.355	1.772
1.4	1.550	2.672	3.753
1.5	2.707	5.266	7.945
1.6	4.728	10.38	16.82
1.7	8.258	20.46	25.60
1.8	14.42	40.32	75.38
1.9	25.18	79.47	159.6
2.0	43.98	156.3	337.8

表1は、(6-5)式から得られる R と V_w の関係を数値で示したものである。変位の許容限界値として、 $4\sigma, 4.5\sigma, 5\sigma$ 程度のピークレベルを想定し、前述のように、最大変位ピーク値の期待値を 3σ として $n=50$ とすれば、(3-2)式から得られる破壊確率は、それぞれ 0.03457, 0.00854, 0.00211 であり、最適安全率はそれぞれ 1.33, 1.5, 1.67 になる。原子力発電所のような重要建築物は十分な安全率を考えた弾性設計になるので、最適降伏震度を高く設定し、1とした。 λ と C_s の変動係数は5%とした。

表中の安全率とパラメータの変動係数に対して、正の V_w が得られるためには、 R はそれぞれ 0.802, 0.813, 0.839 より大きくなければならない。

(4-7)式と(6-4)式の降伏震度がほぼ一致すれば、3つの不確定パラメータの変動が最適降伏震度に及ぼす影響が十分小さく、全損害額を最小にする最適設計に基づく唯一の値としての安定した最適降伏震度が存在することを意味する。

表1から分かるように、 V_w が20%程度またはそれ以下であれば、 R はほぼ1に等しい値になる。結局、 \tilde{C}_Y は $\bar{C}_{Y,opt}$ にはほぼ等しい値になるから、前述のように、最適設計に基づく唯一の値としての最適降伏震度が存在し、耐震設計が可能になる。

しかしながら、 V_w がさらに大きくなると、 R は1より大きく増加関数になるので、 \tilde{C}_Y と $\bar{C}_{Y,opt}$ の差異が徐々に大きくなる。これは、 V_w が大きくなっても最適降伏震度は存在するが、 V_w の変動が最適降伏震度に及ぼす影響が大きくなり、安定した唯一の値としての最適設計パラメータが存在しないことを意味する。

それ故、民間企業の実験による電力事業は、建築物崩壊による全損害額の期待値を最小にする最適設計に基づく安定した唯一の値としての最適設計パラメータが決まらず、経済的に合理的な設計計画の立案が困難になり、利益を追求するビジネスとして成立しないため、原子力発電所建設は非ということになる。

7. 結論

原子力発電所は、ひとたび地震・津波等の自然災害による損傷・崩壊が生じると、同時に、放射能汚染災害が引き起こされ、立地周辺地域に甚大な被害をもたらす。さらに、40～60年と云われる原発寿命を、事故がなく、無事、役割を全うすることができても、そのあとに残される多くの使用済み燃料の保管および廃炉・解体処分のために必要な時間と膨大な経費を想定するならば、原発建設による一民間企業の電力事業が利益を追求

するビジネスとして成立するか否かの問題が生じる。本報告は、このような問題を建築物崩壊による全損害額を最小にする最適設計に基づく唯一の値としての最適設計パラメータが存在するか否かの問題に置換し、原発建設の是非を最適設計という経済性を考慮した科学的観点から論及した。

解析結果から、建築物崩壊による損害額の変動が大きくなる場合は、安定した唯一の値としての最適設計パラメータが決まらず、科学的に合理的な設計計画の立案が困難になるという意味で、原発建設は非であるという結論が得られた。さらに、現行の耐震設計の設計式に最適設計に基づく重要度係数と地震地域係数を陽な形で合理的に導入する一手法についても触れた。

APPENDIX A

\bar{P}_f 点回りで展開し、下記のように近似する。

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \exp\{-\lambda P_f(x)t\} p_X(x) dx = \\ \exp\{-\lambda \bar{P}_f t\} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \lambda^2 t^2 \left[(P_f - \bar{P}_f)^2 \right] - \dots \right\} \\ \approx \exp\{-\lambda \bar{P}_f t\} \end{aligned} \quad (A-1)$$

ただし、 X ：不確定因子を表す確率変数

$$\bar{P}_f = \int_0^\infty \exp\{-\alpha_n(x-u_n)\} p_X(x) dx$$

APPENDIX B

$$\begin{aligned} C \left(1 + \frac{\sqrt{6} V_{\lambda p,n} \bar{C}_{Y,opt,G} D_{es} F_{es} R_t}{\pi \mu_{opt}} \right) = D_{es} F_{es} R_t \left\{ 1 + \frac{\sqrt{6} V_{\lambda p,n}}{\pi \mu_{opt}} \cdot \right. \\ \left. \left[\ln \tilde{Z} - \ln D_{es} F_{es} R_t + \bar{C}_{Y,opt,G} \right] \right\} \end{aligned} \quad (B-1)$$

参考文献

- [1] 地震荷重—その現状と将来の展望、1987年、日本建築学会、丸善株式会社
- [2] 梅村魁：新しい耐震設計、日本建築センター、昭和56年
- [3] 青木義次：重要度係数の最適解、その2、日本建築学会論文報告集、第267号、昭和53年5月
- [4] Masami Hanai：Assessment of Load Factor by Means of Structural Reliability. Trans. of A.I.J., No.231, May, 1975
- [5] 洪起：構造信頼性理論に基づく最適設計、日本建築学会構造系論文集、481号、1996年3月
- [6] 神田順、他：地震荷重を変動させたときの各種建物の建設費について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994年
- [7] Alfredo H - S. Ang, Wilson H. Tang：建築のための確率・統計の応用、丸善株式会社